

A Triangular Patch Antenna with a Trapezoidal Fractal with Two Sublayers with Complementary Layers**Mohamad Reza Sepehri^{1,2}, M.Sc., Mohammad Amin Honarvar^{1,2}, Assistant Professor**¹Department of Electrical Engineering- Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran²Smart Microgrid Research Center- Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
mrs.1357@yahoo.com, amin.honarvar@gmail.com**Abstract**

In this paper, the improvement of the radiation pattern and the properties of multi-band trapezoidal fractal antenna with self-complementary layers have been investigated. The antenna is excited by a microstrip feed-line with two sub-layers to increase bandwidth and improve the radiation pattern. The dual-layered complementary arrangement has had positive effects on the resonance frequencies and improved the properties of the radiation patterns. This antenna offers a good efficiency, suitable bandwidth, and radiated pattern in a designed resonance frequency. Six bands ($S_{11} < -15$ dB), with center frequencies of $f_1=0.9$ GHz, $f_2=1.57$ GHz, $f_3=1.85$ GHz, $f_4=2.15$ GHz, $f_5=2.5$ GHz and $f_6=3.5$ GHz are obtained within the band of (0.5-4) GHz. This antenna offers good efficiency which changes from 70% to 95%. The measurement results clearly confirm the simulation results

Keywords: antenna, micro-strip technology, trapezoidal fractal, complementary layer**Received:** 21 July 2021**Revised:** 21 October 2021**Accepted:** 11 November 2021**Corresponding Author:** Dr. Mohammad Amin Honarvar

Citation: M.R. Sepehri, M.A. Honarvar, "A triangular patch antenna with a trapezoidal fractal with two sublayers with complementary layers", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 14, no. 54, pp. 135-146, September 2023 (in Persian).

آنتن پچ مثلثی با فراکتال دوزنقه‌ای به همراه دو زیر لایه با لایه‌های مکمل

محمد رضا سپهری^۱، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، محمدمامین هنرور^۲، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق- واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲- مرکز تحقیقات ریز شبکه‌های هوشمند- واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

mrs.1357@yahoo.com, amin.honarvar@pel.iaun.ac.ir

چکیده: در این مقاله بهبود الگوی تشعشی و خواص چند بانده آنتن فراکتال دوزنقه‌ای با لایه‌های خود مکمل، مورد بررسی قرار گرفته است. تغذیه آنتن توسط خط مایکرواستریپ و با دو زیر لایه، برای افزایش پهنای باند و بهبود پترن تشعشی ایجاد شده است. طبقه بندی دو لایه مکمل باعث اثرات مثبت در فرکانس تشدید و بهبود پترن تشعشی شده است. این آنتن بازدهی، پهنای باند و الگوی تشعشی مناسبی، در فرکانسهای تشدید طراحی شده ایجاد کرده است. شش فرکانس تشدید با افت برگشتی کمتر از ۱۵ دسیبل (S₁₁ کمتر از ۱۵- دسیبل) در محدوده فرکانسی ۰/۵ تا ۴ گیگاهرتز به دست آمده است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری صحت نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی را به وضوح تایید می‌کند.

کلمات کلیدی: آنتن، تکنولوژی مایکرواستریپ، فراکتال دوزنقه‌ای، لایه مکمل

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۴/۳۰

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۸/۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۸/۲۰

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمدمامین هنرور

نشانی نویسنده‌ی مسئول: نجف‌آباد- بلوار دانشگاه- دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد- دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

آنتن‌ها یکی از اساسی‌ترین اجزاء تشکیل دهنده هر شبکه مخابراتی بی‌سیم هستند که وظیفه آنها برقراری ارتباط با محیط انتشاری پیرامون خود است [۱،۲]. امروزه کاربردهای بسیار زیاد مخابرات بی‌سیم باعث شده که تقاضا برای استفاده از آنتن‌هایی با ابعاد کوچک و با قابلیت انطباق با سیستم‌های قابل حمل به شدت افزایش یابد. همچنین سیستم‌های مخابراتی مختلف با استانداردها و طیف فرکانسی منحصر به فرد خود عمل می‌کنند [۳،۴]. لذا آنتن‌های مورد نیاز این سیستم‌ها باید قادر به حفظ عملکرد مناسب خود در محدوده‌های فرکانسی مختلف باشد و این موضوع طراحی این نوع از آنتن‌ها را پیچیده می‌کند. عملکرد این سیستم‌ها توسط آنتن‌های چند-باند^۱ مایکرواستریپ^۲ تامین می‌شود [۵،۶]. تا به حال روش‌های بسیار زیادی برای طراحی آنتن‌های چند-باند که قادر به عملکرد مناسب در باندهای فرکانسی شبکه محلی بی‌سیم^۳ (WLAN) [۷،۸]، وایمکس^۴ (قابلیت همکاری جهانی برای دسترسی به مایکروویو) (WiMAX) [۹،۱۰] و سیستم جهانی ارتباطات سیاره^۵ (UMTS) [۱۱،۱۲] هستند، انجام شده است.

یکی از انواع روش‌های چند-باند کردن این آنتن‌ها استفاده از هندسه فراکتال^۶ است [۱۳،۱۴]. آنتن فراکتال از زمان معرفی آن در سال ۱۹۹۵ توسط کوهن مورد توجه زیادی قرار گرفته است. این آنتن‌ها ترکیبی از فناوری آنتن و هندسه فراکتال است. بیشتر اشکال فراکتالی دارای خاصیت خود-متشابهی هستند، به این معنی که مشابه همان جسم، اما در مقیاس‌های مختلف هستند [۱۵،۱۶]. عنصرهای آنتن فراکتالی به عنوان ترکیبی مجازی از سلف و خازن‌ها است و باعث شده تا آنتن فراکتال فرکانس‌های تشدید متفاوت و متعددی داشته باشد. از آنجایی که آنتن فراکتال دارای خاصیت خود-متشابهی است، سطح‌های مشابه باعث توزیع فرکانس‌های تشدید مختلف می‌شود و لذا با طراحی مناسب فراکتال می‌توان فرکانس‌های تشدید را جابجا نمود. خاصیت دیگر آنتن‌های فراکتالی افزایش طول الکتریکی و در نتیجه کاهش فرکانس تشدید و کوچک شدن آنتن است [۱۷،۱۸]. به عنوان مثال در مرجع [۱۹] یک نمونه از آنتن فراکتال سیرپینسکی در سه تکرار طراحی شده و دارای رفتار چند-باند با سه باند فرکانسی WLAN، Bluetooth و UHF-RFID است. نمونه‌ای دیگر آنتن فراکتالی با تغذیه موجبری هم صفحه^۷ (CPW) جهت کاربرد در باند فرکانسی GSM900 و ISM2.4 در مرجع [۲۰] گزارش شده است. آنتن سه باند در باندهای فرکانسی GSM (سیستم جهانی برای موبایل)^۸ و UMTS در مرجع [۲۱] طراحی شده است.

آنتن‌های فراکتال به دو دسته کلی چند باند و اندازه کوچک تقسیم شده‌اند و بسته به کاربردی که برای آنتن در نظر گرفته می‌شود، آنتن فراکتال مناسب طراحی می‌شود [۲۲،۲۳]. لذا با توجه به داشتن چندین باند فرکانسی در طراحی آنتن در این تحقیق از آنتن سیرپینسکی استفاده شده است [۲۴،۲۵]. به‌طور کلی در آنتن‌های سیرپینسکی با تغییر ساختار فراکتالی برای تکرارهای مختلف، می‌توان فرکانس‌های رزونانسی آنتن را جابجا کرد. علی‌رغم وجود مزایای زیاد برای ساختارهای سیرپینسکی، از مهمترین عیب این ساختارها می‌توان به کاهش پهنای باند آنتن در هر باند کاری و همچنین یکسان نبودن پترن تشعشعی در تمامی باندهای فرکانسی اشاره کرد [۲۶،۲۷].

با افزایش تقاضا برای آنتن‌های چند-باند، آنتن‌های طرح‌پذیر مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. این آنتن‌ها با حذف نیاز به آنتن‌های پهن-باند پیچیده، سطوح بیشتری از قابلیت را ارائه می‌دهند. طراحی آنتن‌های معمول به دلیل ساختار ثابت آنها، شامل محدودیت‌های تحمیلی طرح‌پذیری دوباره نمی‌گردند. آنتن‌های طرح‌پذیر به دلیل توانایی در تطبیق با شرایط عملیاتی جدید، مشخصات مطلوبی را از خود نشان می‌دهند [۲۸].

یکی از آنتن‌های طرح‌پذیر با کمک سوئیچ RF MEMS، آنتن خود-متشابه با ساختار فراکتالی سیرپینسکی است [۲۹،۳۰]. در این طراحی، ابتدا مشخصات آنتن تک‌المانی به دست آمده و سپس طراحی و ساخت برای به دست آمدن آنتن چند فرکانسی صورت پذیرفته است. در واقع این آنتن‌ها پترن تشعشعی مشابه را در باندهای فرکانسی مختلف نشان داده و با طرح‌پذیری و تغییر پیکر سازه به کمک سوئیچ‌های فرکانس رادیویی سیستم میکروالکترومکانیکی^۹ (RF MEMS) پترن ثابت، پاسخ فرکانسی و باند کاری متفاوت را نشان می‌دهند. آنتن‌های فراکتال سیرپینسکی با تکرار نامحدود، باندهای فرکانسی نامحدودی را می‌توانند ایجاد نمایند. با این وجود با افزایش تکرارها پیچیدگی ساختار نیز افزایش می‌یابد. خط مشی این آنتن‌ها برای حذف هرگونه گلبرگ کناری که پس از فرکانس تشدید اولیه ایجاد می‌گردد، ایجاد فیلتر پایین‌گذر بین اتصال‌های مثلثی داخلی است.

در این مقاله یک آنتن دوزنقه‌ای فراکتال با ساختار دو لایه که شامل شش تکرار دوزنقه‌ای در لایه اول و شش تکرار مکمل در لایه دوم بوده و برای کاربردهای ارتباطی بی‌سیم در باندهای فرکانسی GSM900, GSM850, GPS, GSM1800, UMTS, LTE2500, Wi-Fi/WLAN, WIMAX و LTE2300 است، پیشنهاد شده است. آنتن پیشنهادی افت برگشتی مناسب با بهبود پهنای باند و پترن تشعشعی یکسان در تمام فرکانس‌های تشدید را ایجاد کرده است. در این طرح سعی شده تا با توجه به استفاده از تکنیک تغذیه دو لایه و به کار بردن زمین ناقص و ایجاد شیار در آن، علاوه بر کوچک‌سازی آنتن و پهنای باند مناسب، پترن تشعشعی یکسان در تمامی باندهای فرکانسی به دست آید.

۲- طراحی و پیکربندی آنتن

آنتن پیشنهادی شامل دو زیر لایه مختلف است. زیر لایه بالایی توسط ساختار دوزنقه‌ای فراکتالی در تکرار ششم با زیر لایه FR4 با ثابت دی الکتریک ۴/۴ و تانژانت تلفات ۰/۰۰۰۹ و زیر لایه پایینی که پیچ مکمل است Rogers RO4003 با ثابت دی الکتریک ۳/۵۵ و تانژانت تلفات ۰/۰۰۲۷ است. ضخامت زیر لایه FR4 برابر ۰/۸ میلی‌متر و ضخامت راجرز ۰/۸۱۶ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. اندازه زیر لایه آنتن با طول و عرض ۹۲ و ۶۴ میلی‌متر است. لایه پایینی بر روی زیر لایه که مشخصات آن در بالا آمده قرار داده شده است. ساختار مکمل در زیر لایه پایینی قرار دارد که در شکل (۱) برای تکرار ششم نشان داده شده است. تغذیه آنتن به وسیله خط تغذیه مایکرواستریپ با عرض ۱/۸ میلی‌متر و طول ۱۲ میلی‌متر نیز در شکل (۱) نشان داده شده است. طول و عرض زمین آنتن با اندازه ۵۵ و ۲۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده که با طراحی شکاف‌هایی در آن، باعث افزایش پهنای باند و تنظیم فرکانس‌های تشدید، شده است. آنتن مورد نظر آنتن پیچ دوزنقه‌ای مکمل نام‌گذاری می‌شود.

۲-۱- محاسبه طول دوزنقه در تکرار اول

با استفاده از رابطه (۱) ابعاد آنتن در اولین فرکانس تشدید تعیین می‌شود [۳۱، ۳۲]:

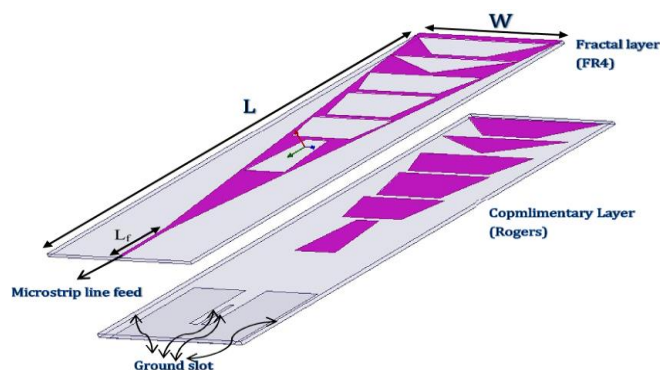
$$f_0 \approx \frac{c}{2l\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

که در آن f_0 (برحسب هرتز) اولین فرکانس تشدید، c سرعت نور، l طول آنتن و ϵ_r ثابت دی الکتریک زیر لایه است. فرکانس‌های تشدید مراتب بالاتر را می‌توان از رابطه‌های (۲)، (۳) و (۴) که نسبت مستقیم با یک چهارم یا نصف طول موج دارد تعیین کرد:

$$\lambda_n = \frac{c}{f_n \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (2)$$

$$w_n \approx \frac{\lambda_n}{2}, n = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (3)$$

$$\epsilon_{\text{eff}} \approx \frac{\epsilon_r + 1}{2} \quad (4)$$



شکل (۱): آنتن پیچ دوزنقه‌ای مکمل با شش تکرار

Figure (1): Complementary trapezoidal patch antenna with six repetitions

که در آن طول موج فرکانس تولید شده، w_n طول دوزنقه‌های فراکتالی طراحی شده و ϵ_{eff} ثابت دی الکتریک موثر است. f_n (برحسب هرتز) فرکانس تشدید است که به ترتیب برابرند با:

$$n = 1 \Leftrightarrow f_1 = 1.57 \text{ GHz}$$

$$n = 2 \Leftrightarrow f_2 = 1.8 \text{ GHz}$$

$$n = 3 \Leftrightarrow f_3 = 2.1 \text{ GHz}$$

$$n = 4 \Leftrightarrow f_4 = 2.55 \text{ GHz}$$

$$n = 5 \Leftrightarrow f_5 = 3.55 \text{ GHz}$$

با شبیه‌سازی آنتن در نرم‌افزار HFSS جهت فرکانس‌های تشدید مورد نظر، طول دوزنقه‌های فراکتالی برحسب میلی‌متر برابرند با:

$$w_1=60, w_2=50, w_3=40, w_4=36, w_5=13$$

طول دوزنقه طراحی شده برای فرکانس تشدید اول برابر است با:

$$w \approx \frac{\lambda}{2} \quad (5)$$

با توجه به اینکه دومین فرکانس تشدید مورد نیاز جهت کاربرد در باند فرکانسی GPS برابر با ۱/۵۷ گیگا هرتز است، لذا طول دوزنقه به صورت تقریب برابر است با:

$$e_{\text{eff}} \approx \frac{4.4+1}{2} = 2.7 \quad (6)$$

$$\lambda \approx \frac{300}{1.57\sqrt{2.7}} = 117 \quad (7)$$

$$w \approx \frac{117}{2} = 58.5 \text{ mm} \quad (8)$$

۳- نتایج شبیه‌سازی و بررسی

در این قسمت هدف بررسی ساختار جدید دو لایه از آنتن‌های فراکتال است. در آنتن‌های فراکتال مشکل اساسی زیاد بودن تلفات بازگشتی در فرکانس‌های پایین است که برای رفع این مشکل با چندین تکرار در هر مرحله مشکل را می‌توان حل کرد، از طرفی مهمترین بحث در مورد آنتن‌های فراکتالی مشخصات پترن تشعشی در بیشتر فرکانس‌های تشدید آنتن به یکدیگر نزدیک باشند، لذا با استفاده از تکنیک دومی که در این پژوهش استفاده شده است به کمک ساختارهای مکمل سعی شد مشخصات پترن تشعشی نیز بهبود یابد.

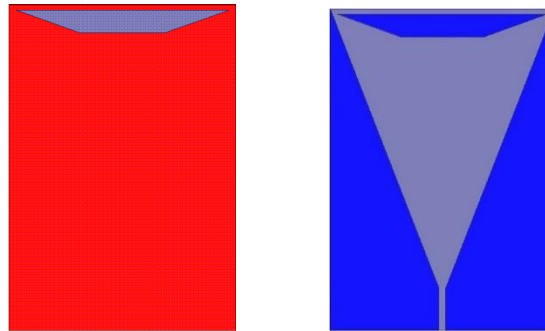
۳-۱- شبیه‌سازی آنتن پچ مثلثی در تکرار اول

شکل (۲) ساختار کلی آنتن دو لایه به همراه لایه‌های مکمل را نشان می‌دهد و به منظور ایجاد یک توزیع جریان مناسب در این ساختار از همان تغذیه خط مایکرواستریپ استفاده شده است که برای این آنتن از دو زیر لایه یکی زیر لایه بالایی FR4 با ضخامت ۰/۸ میلی‌متر و ثابت گذردهی نسبی ۴/۴ و زیر لایه پایینی Rogers RO4003 با ضخامت ۰/۸۱۳ میلی‌متر و ثابت گذردهی ۳/۵۵ استفاده شده است. بر روی زیر لایه بالایی آنتن فراکتال دوزنقه‌ای [۳۱،۳۲] در تکرار اول به همراه خط تغذیه قرار دارد و این در حالی است که بر روی زیر لایه پایینی پچ مکمل فراکتال دوزنقه‌ای قرار گرفته است.

افت برگشتی یک نسبت لگاریتمی است که در واحد دسیبل اندازه‌گیری می‌شود، افت برگشتی کمتر انرژی کمتری را منعکس کرده و به صورت یک عدد منفی بیان می‌شود. بر حسب دسیبل مقادیر S11 کمتر از ۱۰ دسیبل پهنای باند آنتن را مشخص می‌کند. در این مقاله شبیه‌سازی با نرم‌افزار HFSS انجام شده است. در شکل (۳) افت برگشتی آنتن فراکتالی با یک تکرار مشاهده می‌شود. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود سه باند فرکانسی در محدوده فرکانسی ۴-۰/۵ گیگاهرتز تولید شده است.

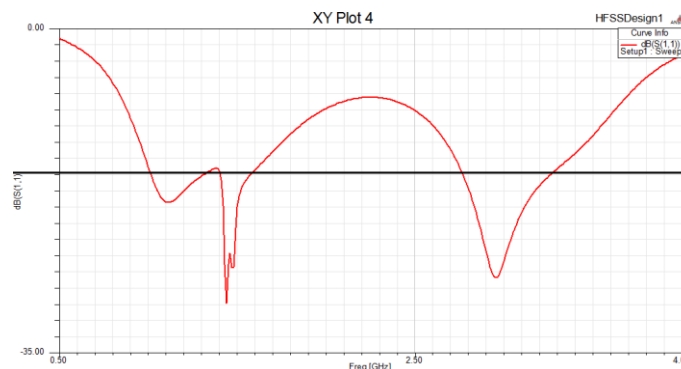
وقتی فرکانس کار به فرکانس تشدید نزدیک می‌شود، دامنه جریان‌های سطحی که روی هادی جریان پیدا می‌کنند اهمیت می‌یابند و تشدید هنگامی اتفاق می‌افتد که اندازه هادی به اندازه نصف طول موج برسد. همان‌طور که در شکل (۴-الف) مشاهده می‌شود

در شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار HFSS مقدار w_1 برابر با ۶۰ میلی‌متر به دست آمده که بسیار نزدیک به مقدار محاسبه شده است. در شکل (۴-ب) توزیع جریان در آنتن پچ مثلثی در فرکانس ۱/۵۷ گیگا نشان داده شده و همان‌طور که انتظار می‌رفت بیشترین توزیع جریان در این فرکانس در اطراف دوزنقه طراحی شده به وجود آمده است و صحت انجام محاسبات را تایید می‌کند.



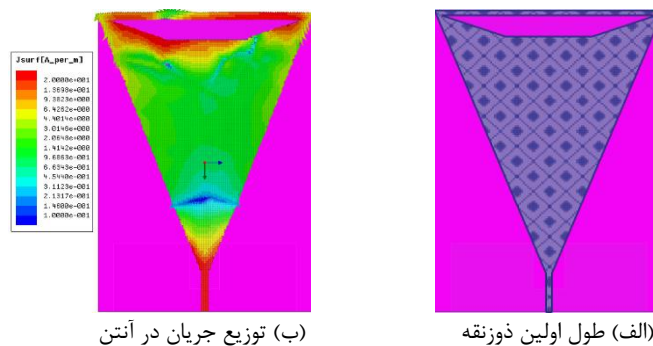
شکل (۲): ساختار کلی آنتن دو لایه به همراه لایه‌های مکمل در تکرار اول

Figure (2): The general structure of the two-layer antenna with complementary layers in the first iteration



شکل (۳): افت برگشتی S_{11} (dB) آنتن دو لایه به همراه لایه‌های مکمل در تکرار اول بر حسب فرکانس (GHZ)

Figure (3): Reversible drop S_{11} (dB) of two-layer antenna with complementary layers in the first iteration



(ب) توزیع جریان در آنتن

(الف) طول اولین دوزنقه

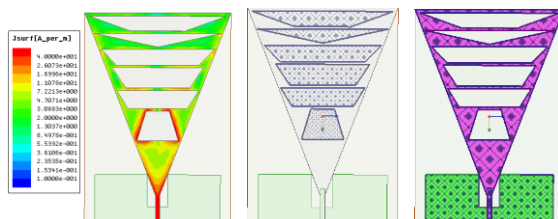
شکل (۴): نتیجه در آنتن پچ مثلثی

Figure (4): The result in a triangular patch antenna, (a) The length of the first trapezoid, (b) The current distribution in the antenna

۳-۲- شبیه‌سازی آنتن پچ مثلثی در تکرار ششم

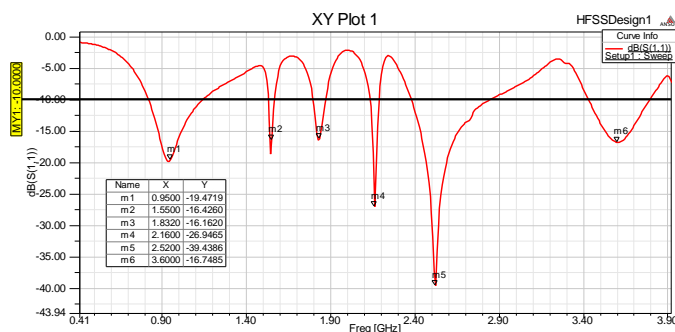
پس از شش مرحله تکرار فرم نهایی آنتن پیشنهادی به دست می‌آید. در این مرحله فرکانس تشدید را جهت کاربرد در باند فرکانسی وای-مکس برابر ۳/۵ گیگا هرتز انتخاب می‌شود. طول دوزنقه تکرار ششم با ربع طول موج فرکانس رابطه مستقیم دارد و ربع طول موج، تقریباً برابر ۱۳ میلی‌متر به دست آمده است.

ساختار کلی آنتن دو لایه به همراه لایه‌های مکمل در تکرار ششم در شکل (۵) به همراه زمین ناقص و توزیع جریان در فرکانس ۳/۵ گیگا هرتز نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود آنتن دارای شش فرکانس تشدید است که تلفات بازگشتی بهینه شده ساختار در شکل (۶) نشان داده شده است. برای اطمینان از روند شبیه‌سازی، آنتن مورد نظر با نرم افزار CST نیز شبیه‌سازی شده که افت برگشتی آن در شکل (۷) قابل مشاهده است. همان‌طور که در شکل (۶) مشخص شده آنتن فراکتالی دوزنقه‌ای دو لایه مکمل با شش تکرار دارای شش فرکانس تشدید با مقادیر، ۰/۹، ۱/۵۷، ۱/۸، ۲/۱، ۲/۵۵ و ۳/۵ گیگا هرتز با افت برگشتی ۲۰-، ۱۸-، ۱۶-، ۲۶-، ۳۹- و ۱۷- دسیبل بوده و مناسب جهت کاربرد در باندهای فرکانسی GSM(850&900)، GPS، GSM1800، UMTS، LTE(2300&2500)، Wi-Fi/WLAN، و WIMAX است.



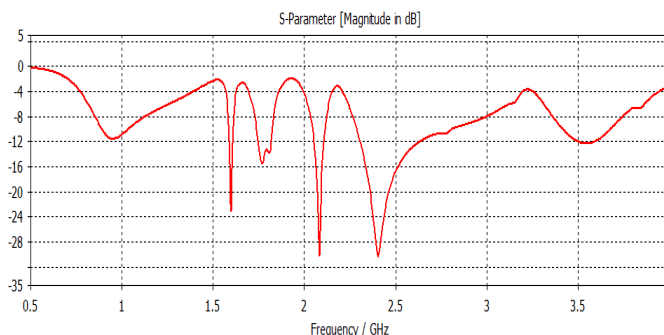
شکل (۵): ساختار کلی آنتن دو لایه به همراه لایه‌های مکمل و توزیع جریان در تکرار ششم

Figure (5): The general structure of a two-layer antenna with complementary layers and current distribution in the sixth iteration



شکل (۶): افت برگشتی آنتن دو لایه به همراه لایه‌های مکمل در تکرار ششم

Figure (6): Reversible drop of two-layer antenna with complementary layers in the sixth iteration



شکل (۷): افت برگشتی آنتن دو لایه به همراه لایه‌های مکمل در تکرار ششم توسط نرم افزار CST

Figure (7): Reversible drop of two-layer antenna with complementary layers in the sixth iteration by CST software

مقایسه دو آنتن فراکتال ذوزنقه‌ای با شش تکرار در حالت تک لایه و دو لایه در شکل (۸) نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده برای تلفات بازگشتی آنتن ذوزنقه‌ای فراکتالی دو لایه نسبت به ساختار تک لایه، آنتن دو لایه دارای خواص بهتری از لحاظ افت برگشتی و پهنای باند فرکانسی است. از طرفی یک جابجایی فرکانسی به سمت فرکانس‌های کمتر برای آنتن دو لایه مکمل نسبت به آنتن‌های تک لایه وجود دارد که امکان کوچک‌سازی آنتن را فراهم می‌سازد.

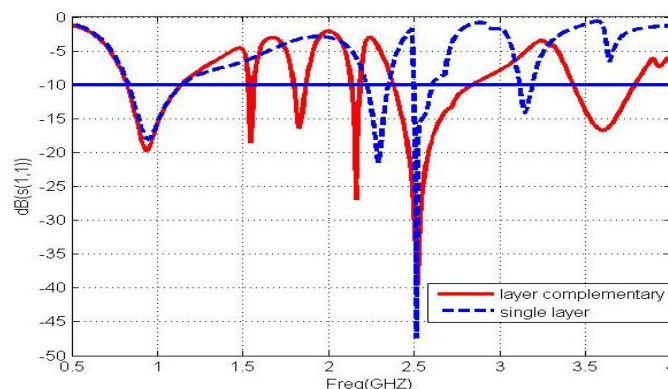
مهمترین و اساسی‌ترین دلیل استفاده از آنتن دو لایه با ساختار لایه مکمل یکسان بودن پترن‌ها در تمامی باندهای فرکانسی آنتن است، همان‌گونه که در شکل (۹) مشاهده می‌شود پترن‌ها در کلیه فرکانس‌های تشدید شبیه هم بوده که برای آنتنی چند بانده بسیار مناسب است این در حالی است که در آنتن تک لایه پترن‌ها در تمامی فرکانس‌های تشدید مشابه نیستند که در شکل (۹) مقایسه چند پترن تشعشی در صفحه ZY در آنتن دو لایه و تک لایه نشان داده شده است، علاوه بر این مزیت همانگونه که مشاهده می‌شود گلبزرگ کناری در پترن آنتن‌ها مشاهده نمی‌شود و فقط در فرکانس ۳/۵ گیگا هرتز وجود دارد.

۴- ساخت آنتن و بررسی نتایج

شکل (۱۰) آنتن پیشنهادی ساخته شده را نشان می‌دهد. لایه بالایی که آنتن فراکتال ذوزنقه با شش تکرار از جنس مس بر روی آن قرار دارد، FR4 با ثابت دی الکتریک ۴/۴ و تانژانت تلفات ۰/۰۲ و لایه پایینی که صفحات مکمل بر روی آن قرار دارند، Rogers RO4003 با ثابت دی الکتریک ۳/۵۵ و تانژانت ۰/۰۰۲۷، ضخامت لایه بالایی برابر ۰/۸ میلی‌متر و ضخامت لایه پایینی برابر ۰/۸۱۶ میلی‌متر است. همچنین عرض لایه‌ها (W) برابر ۶۴ میلی‌متر و طول آنها برابر ۹۲ میلی‌متر، طول خط تغذیه (Lf) برابر ۱۲ میلی‌متر و عرض آن (Wf) برابر ۱/۸ میلی‌متر، طول صفحه زمین که بر پشت لایه دوم نصب شده است برابر ۵۵ میلی‌متر و عرض آن ۲۱ میلی‌متر است.

در شکل (۱۱) افت برگشتی آنتن فراکتال ذوزنقه ساخته شده با شش تکرار با افت برگشتی آنتن شبیه‌سازی شده مقایسه شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رفت افت برگشتی آنتن ساخته شده بسیار شبیه به آنتن شبیه‌سازی شده است.

در شکل (۱۲) مقایسه پترن تشعشی آنتن فراکتال ذوزنقه با شش تکرار ساخته شده در صفحه XZ در چهار فرکانس ۰/۹۲، ۱/۸، ۲/۱ و ۲/۵ گیگا هرتز با آنتن شبیه‌سازی شده، نشان داده شده که موید درستی محاسبات و شبیه‌سازی است.



شکل (۸): مقایسه دو آنتن فراکتال ذوزنقه‌ای در تکرار ششم به صورت تک لایه و دو لایه با لایه مکمل

Figure (8): Comparison of two trapezoidal fractal antennas in the sixth iteration as a single layer and two layers with a complementary layer

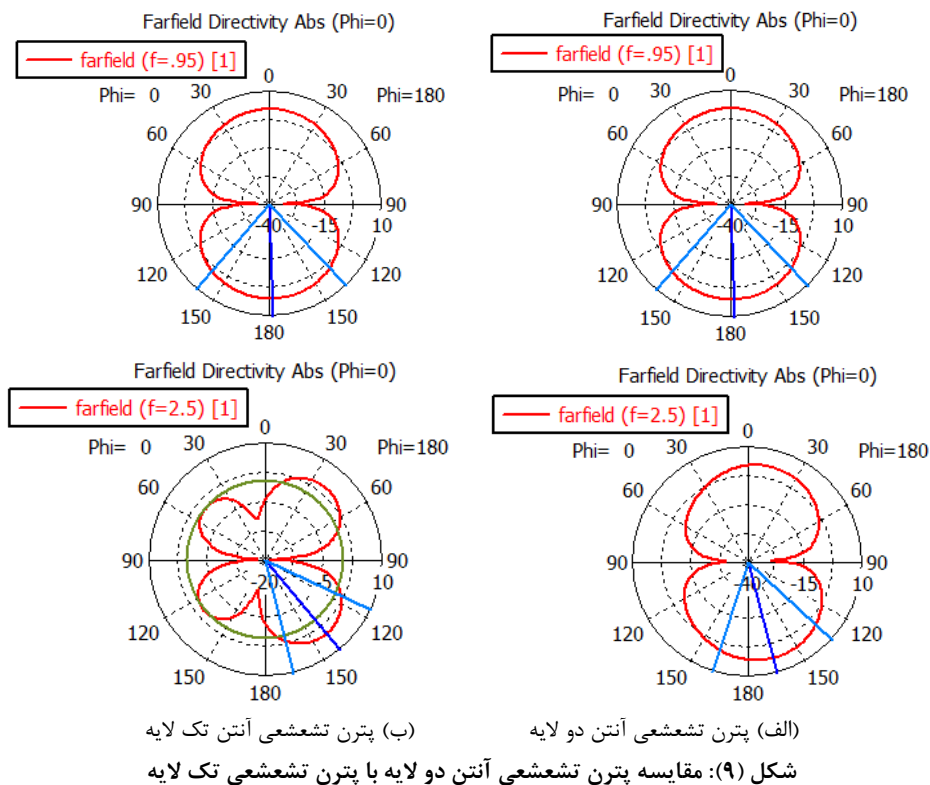


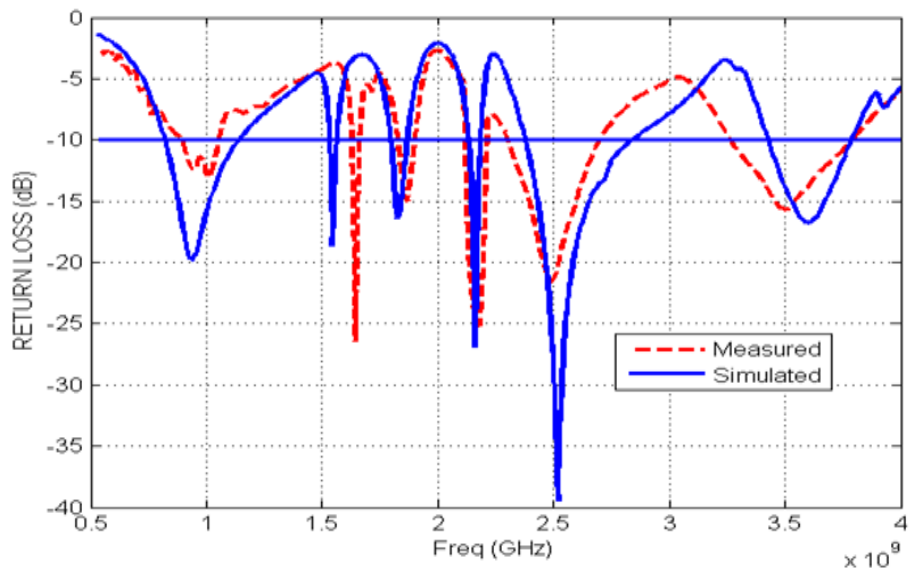
Figure (9): Comparison of two-layer antenna radiation pattern with single-layer radiation pattern, (a) Radiant pattern of two-layer antenna, (b) Radiant pattern of single-layer antenna



شکل (۱۰): آنتن ساخته شده فرکتال ذوزنقه بالای های مکمل همراه با شش تکرار
Figure (10): Fractal trapezoidal antenna made of complementary top with six reps

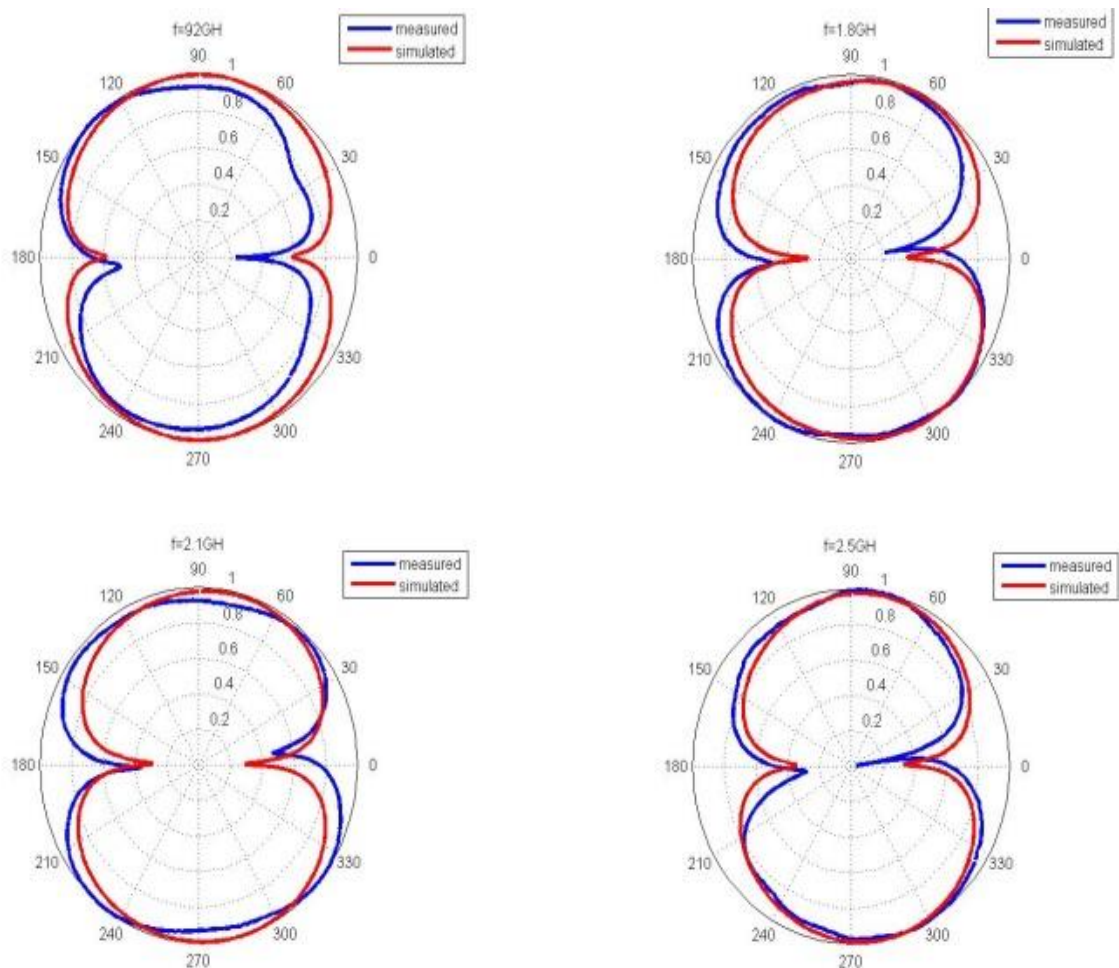
۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک آنتن فرکتال ذوزنقه‌ای دو لایه برای کاربردهای مخابرات بی‌سیم در باندهای فرکانسی (GSM(850&900), GSM1800, GPS, UMTS, Wi-Fi/WLAN, LTE(2300&2500) و WIMAX ایجاد شده است. پارامترهای اساسی آنتن همچون افت برگشتی، میدان‌های پترن تشعشعی و توزیع جریان در باندهای فرکانسی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. این آنتن افت برگشتی با پهنای باند مناسب و پترن تشعشعی یکسان در تمام فرکانس‌های تشدید را ارائه داده است. بنابراین این آنتن برای مخابرات چند بانده بی‌سیم مناسب است. برای بررسی درستی نتایج شبیه‌سازی یک نمونه آزمایشگاهی از آنتن ساخته شد و درستی نتایج نشان داده شد.



شکل (۱۱): مقایسه افت برگشتی آنتن ساخته شده با شبیه‌سازی

Figure (11): Comparison of reversible drop of antenna made with simulation



شکل (۱۲): مقایسه پترن تشعشعی آنتن فرکتال دوزنقه با شش تکرار ساخته شده در صفحه xz در چهار فرکانس ۰/۹۲، ۱/۸، ۲/۱ و ۲/۵ گیگا هرتز با آنتن شبیه‌سازی

Figure (12): Comparison of the radial pattern of a trapezoidal fractal antenna with six iterations made on the xz plane at four frequencies of 0.92, 1.8, 2.1 and 2.5 GHz with a simulation antenna

سپاسگزاری

این مقاله از پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد در دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد استخراج شده است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از همکاران حوزه پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی و داوران محترم که ما را در انجام و ارتقای کیفی این مقاله یاری نموده‌اند، اعلام نمایند.

References

مراجع

- [1] M. Vaheb, A. Hashemi, H. Emami, M. Emami, "Design and simulation of a sample of integrated broadband antenna and omni-directional for marine floats", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 7, no. 25, pp. 29-40, Spring 2016 (dor: 20.1001.1.23223871.1395.7.25.4.3).
- [2] M. Zobeyri, A. Eskandari, "Design and fabrication of novel single- and dual-band bandpass filters with modern zero-degree feed structure for wireless communications", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 9, no. 33, pp. 47-61, Spring 2018 (dor: 20.1001.1.23223871.1397.9.33.5.4) (in Persian).
- [3] C. Mahajan, V. Vyas, "Wine glass shaped microstrip antenna with woodpile structure for wireless applications", *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 37-44, March 2019.
- [4] E. Shirazi, M. Honarvar, "Design and simulation of a novel broadband circularly polarized microstrip slot antenna", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 7, no. 26, pp. 45-52, Summer 2016 (dor: 20.1001.1.23223871.1395.7.26.5.6).
- [5] F. Pizarro, D. Ramírez-Gil, A. Algaba-Brazález, L. F. Herrán-Ontanón, E. Rajo-Iglesias, "Comparison study of 4x4 butler matrices in microstrip technologies for Ka-band", *AEU- International Journal of Electronics and Communications*, vol. 122, Article Number: 153248, July 2020 (doi: 10.1016/j.aeue.2020.153248).
- [6] D.V. Kiran, D. Sankaranarayanan, B. Mukherjee, "Compact embedded dual-element rectangular dielectric resonator antenna combining sierpinski and minkowski fractals", *IEEE Trans. on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 7, no. 5, pp. 786-791, May 2017 (doi: 10.1109/TCPMT.2017.269046-3).
- [7] K. Wong, H. Chang, C. Wang, S. Wang, "Very-low-profile grounded coplanar waveguide-fed dual-band WLAN slot antenna for on-body antenna application", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 19, no. 1, pp. 213-217, Jan. 2020 (doi: 10.1109/LAWP.2019.2958961).
- [8] S. Su, C. Lee, S. Chen, "Very-low-profile, triband, two-antenna system for WLAN notebook computers", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 9, pp. 1626-1629, Sept. 2018 (doi: 10.1109/LAWP.2018.2858849).
- [9] H. Huang, Y. Liu, S. Zhang, S. Gong, "Multiband metamaterial-loaded monopole antenna for WLAN/WiMAX applications", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 662-665, 2015 (doi: 10.1109/LAWP.2014.2376969).
- [10] G. Li, H. Zhai, Z. Ma, C. Liang, R. Yu, S. Liu, "Isolation-improved dual-band MIMO antenna array for LTE/WiMAX mobile terminals", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 13, pp. 1128-1131, 2014 (doi: 10.1109/LAWP.2014.2330065).
- [11] Y. Ban, J. Chen, S. Sun, J.L. Li, J. Guo, "Printed monopole antenna with a long parasitic strip for wireless USB dongle LTE/GSM/UMTS operation", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp. 767-770, 2012 (doi: 10.1109/LAWP.2012.2205549).
- [12] J. Lu, Y. Wang, "Internal uniplanar antenna for LTE/GSM/UMTS operation in a tablet computer", *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 61, no. 5, pp. 2841-2846, May 2013 (doi: 10.1109/TAP.2013.22-43693).
- [13] S. Velan, E.F. Sundarsingh, M. Kanagasabai, A.K. Sarma, C. Raviteja, R. Sivasamy, J.K. Pakkathillam, "Dual-band EBG integrated monopole antenna deploying fractal geometry for wearable applications", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 249-252, 2015 (doi: 10.1109/LAWP.2014.236-0710).
- [14] S. Zheng, Y. Yin, J. Fan, X. Yang, B. Li, W. Liu, "Analysis of miniature frequency selective surfaces based on fractal antenna-filter-antenna arrays", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp. 240-243, 2012 (doi: 10.1109/LAWP.2012.2189749).
- [15] A. Amini, H. Oraizi, M.A. Chaychi-zadeh, "Miniaturized UWB log-periodic square fractal antenna", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 1322-1325, March 2015 (doi: 10.1109/LAWP.20-15.2411712).

- [16] A. Mohanty, S. Sahu, "Compact wideband hybrid fractal antenna loaded on AMC reflector with enhanced gain for hybrid wireless cellular networks", *AEU- International Journal of Electronics and Communications*, vol. 138, Article Number: 153837, Aug. 2021 (doi: 10.1016/j.aeue.2021.153837).
- [17] Y. Lin, S.S.H. Hsu, "A sierpinski space-filling clock tree using multiply-by-3 fractal-coupled ring oscillators", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 52, no. 11, pp. 2947-2962, Nov. 2017 (doi: 10.1109/JSSC.2017.2732730).
- [18] E. Volkov, E.H. Hellen, "The effect of characteristic times on collective modes of two quorum sensing coupled identical ring oscillators", *Chaos, Solitons & Fractals*, vol. 151, Article Number: 111176, Oct. 2021 (doi: 10.1016/j.chaos.2021.111176).
- [19] J.R. Crute, L.E. Davis, "Loss characteristics of high- ϵ_r microstrip lines fabricated by an etchable thick-film on ceramic MCM technology", *IEEE Trans. on Advanced Packaging*, vol. 25, no. 3, pp. 393-396, Aug. 2002 (doi: 10.1109/TADVP.2002.805551).
- [20] N. Malekpour, M. Honarvar, A. Dadgarpour, "Design and simulation of a compact UWB MIMO antenna with mutual coupling reduction", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 7, no. 25, pp. 15-20, Spring 2016 (doi: 20.1001.1.23223871.1395.7.25.2.1) (in Persian).
- [21] R. Dehghani, R. Aghajani, "Angular resolution enhancement of the MIMO radar by using the 2D nested array method", *Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology*, vol. 11, no. 43, pp. 1-12, Autumn 2020 (doi: 20.1001.1.23223871.1399.11.43.1.4) (in Persian).
- [22] D. Tiwari, J.A. Ansari, A. Saroj, M. Kumar, "Analysis of a miniaturized hexagonal sierpinski gasket fractal microstrip antenna for modern wireless communications", *AEU- International Journal of Electronics and Communications*, vol. 123, Article Number: 153288, Aug. 2020 (doi: 10.1016/j.aeue.2020.153288).
- [23] O. Devesh, J.A. Ansari, M.G. Siddiqui, A.K. Saroj, "Analysis of Modified Square Sierpinski Gasket fractal microstrip antenna for Wireless communications", *AEU- International Journal of Electronics and Communications*, vol. 94, pp. 377-385, Sept. 2018 (doi: 10.1016/j.aeue.2018.07.027).
- [24] A. Mohanty, B.R. Behera, "Insights on radiation modes and pattern diversity of two element UWB fractal MIMO antenna using theory of characteristics modes analysis", *AEU- International Journal of Electronics and Communications*, vol. 135, Article Number: 153726, June 2021 (doi: /10.1016/j.aeue.2021.153726).
- [25] C. P. Baliarda, J. Romeu, A. Cardama, "The kochmonopole: A small fractal antenna", *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, vol. 48, no. 11, pp. 1773-1781, Nov. 2000 (doi: 10.1109/8.900236).
- [26] S. Kumar, S. Srivastava, A.D. Pandey, M.R. Tripathy "Design of miniaturized fractal antenna on two-layer stack", *International Journal of Enhanced Research in Science Technology and Engineering*, vol. 3, no. 8, Aug. 2014.
- [27] Y. Wang, Z. Wang, J. Li, "UHF moore fractal antennas for online GIS PD detection", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 852-855, 2017 (doi: 10.1109/LAWP.2016.2609916).
- [28] K.C. Hwang, "A modified sierpinski fractal antenna for multiband application", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 6, pp. 357-360, Oct. 2007 (doi: 10.1109/LAWP.2007.902045).
- [29] U. Keshwala, S. Rawat, K. Ray, "Design and analysis of eight petal flower shaped fractal antenna for THz applications", *Optik*, vol. 241, Article Number: 166942, Sept. 2021 (doi: 10.1016/j.jleo.2021.166942).
- [30] A. Zohur, H. Mopidevi, D. Rodrigo, M. Unlu, L. Jofre, B.A. Cetiner, "RF MEMS reconfigurable two-band antenna", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 72-75, 2013 (doi: 10.1109/LAWP.2013.2238882).
- [31] P.S.R. Chowdary, A.M. Prasad, P.M. Rao, "Design of modified sierpinski antenna for WLAN applications", *Proceeding of the IEEE/ICECS*, pp. 1-4, Coimbatore, India Feb. 2014 (doi: 10.1109/ECS.2014.6892769).
- [32] G.F. Tsachtsiris, C.F. Soras, M.P. Karaboikis, V.T. Makios, "Analysis of a modified sierpinski gasket monopole antenna printed on dual band wireless devices", *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, vol. 52, no. 10, Oct. 2004 (doi: 10.1109/TAP.2004.834088).

زیر نویس‌ها

1. Multi-band antennas
2. Micro-strip
3. Wireless local area network (WLAN)
4. Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX)
5. Universal Mobile Telecommunication System (UMTS)
6. Fractal geometry
7. Coplanar waveguide

8. Global system for mobile
9. Radio frequency microelectromechanical system